



Das große Buch der Drohnen

Grundlagen – Technik – Flugpraxis



Inhaltsverzeichnis

Über den Autor.....	7
Vorwort.....	8
1 Einführung und Funktion.....	10
1.1 Entwicklungsgeschichte der Quadrocopter und Drohnen	10
1.2 Die Begriffe Quadrocopter, Multicopter, Drohnen.....	12
1.3 „Ready to fly“ RTF-Drohnen.....	12
1.4 Steuerfunktionen und technischer Hintergrund	15
1.6 Flug in „x“- oder „+“-Konfiguration	17
2 Sensoren und GPS.....	19
2.1 Steuerungsplatine oder Flugcontroller.....	20
2.2 Gyro- und Beschleunigungssensoren, IMU.....	22
2.3 Zusätzliche Sensorunterstützung	25
2.4 Luftdrucksensor	26
2.5 Bodenabstandssensoren	27
2.6 Kompass	30
2.7 GPS System	32
2.8 GPS in Multicoptern	37
2.9 Automatisierter Flug, Abflug von Waypoints	40
2.10 Sensoren für die Erkennung von Hindernissen	44
2.11 Weitere Sensoren für Tracking oder Positionierung ohne GPS	45
3 Foto- und Filmflug, Telemetrie und FPV	47
3.1 Kameramontage und Gimbal.....	47
3.2 Onboard-Kameras und Videoaufzeichnungen.....	51
3.3 Telemetrie	55
3.4 First Person View, FPV.....	60
3.5 Videoübertragung	64
3.6 Videobrille	67
3.7 FPV und Legalität.....	69
3.8 FPV Race	70
3.9 Praxisbeispiel zu Telemetrie und FPV.....	71
4 Fernsteuerung und intelligente Bedienung	78
4.1 Fernsteuerung und Empfänger.....	78

4.2 Steuerung über Smartphones.....	85
4.3 Gestensteuerung.....	88
4.4 Sprachsteuerung.....	90
4.5 Home-Funktion.....	90
4.6 Ein Praxisbeispiel.....	92
5 Anwendungen und rechtliche Fragen.....	100
5.1 Anwendungen.....	100
5.2 Allgemeine rechtliche Fragestellungen.....	113
5.3 Richtlinien für Deutschland.....	115
5.4 Richtlinien für Österreich.....	118
5.4 Richtlinien für die Schweiz.....	120
6 Etwas Flugmechanik und Regelungstechnik.....	122
6.1 Etwas Flugmechanik.....	122
6.2 Ein einfaches physikalisches Modell.....	126
6.3 Einstellung der Regler.....	127
6.4 Grundprinzip des Punkteanfliegens mit GPS.....	135
7 Auslegung des Antriebssystems.....	141
7.1 Lithium Polymer, LiPo-Akku.....	143
7.2 Propellerberechnung.....	146
7.3 Drehzahl und Leistungsberechnung.....	150
7.4 Motoren.....	151
7.5 Brushless-Regler.....	153
7.6 Der Einbau und die Verkabelung von Brushless-Motoren und -Reglern.....	164
7.7 Leistungs- und Schubmessung.....	170
8 Bauformen und Konstruktionen von Multicoptern.....	172
8.1 Tricopter.....	172
8.2 Y6-Copter.....	174
8.3 Hexacopter, Octocopter.....	174
8.4 Semi-Scale-Modelle.....	178
8.5 Depronaufbauten.....	184
8.6 Rahmenkonstruktion.....	186
8.7 Bau eines Baumarktframes.....	188
8.8 Bau eines Lastencopters mit 2-kg-Nutzlast.....	191
8.9 Sicherheit.....	195
8.10 Inbetriebnahme und Fehlerquellen.....	197
9 Erstflug und Flugschule.....	201
9.1 Vorbereitungen zum Erstflug.....	201
9.2 Der Heck-Schwebeflug.....	206
9.3 Wegdrehen und erste Figuren.....	211
9.4 Schwierigere Flugfiguren, der Nasen-Schwebeflug.....	214
9.5 Nasenkreis, Promenade, Pirouette, Funnel.....	217
9.6 Tic-Toc, Snake.....	220
Ausklang.....	225
10 Literatur.....	227

1 Einführung und Funktion

1.1 Entwicklungsgeschichte der Quadrocopter und Drohnen

Wer heute einen Quadrocopter kauft, muss sich in der Regel nur wenig oder gar nicht mit technischen Fragestellungen des Modellbaus auseinandersetzen. Die fortschreitende Entwicklung der Elektronik und auch der immer intelligenter werdenden Bedienersoftware hat es in den letzten Jahren ermöglicht, dass die Quadrocopter heute von sehr vielen Anwendern hauptsächlich als Komplettsysteme und RTF, also „Ready

to fly“ erworben werden können. Es ist also heute für den puren Flugspaß gar nicht mehr unbedingt nötig, die Technik dieser faszinierenden Systeme bis ins Detail zu verstehen. Und das ist auch deshalb gut, weil die Quadrocopter so für einen immer breiteren Kreis von Modellpiloten zugänglich gemacht werden können.

Zu Beginn der Entwicklung in den Jahren zwischen 2000 und 2010 waren Quadrocopter aber eher etwas für technikbegeisterte Modellbauer. Man konnte damals die Bauteile für Quadrocopter nur einzeln kaufen,

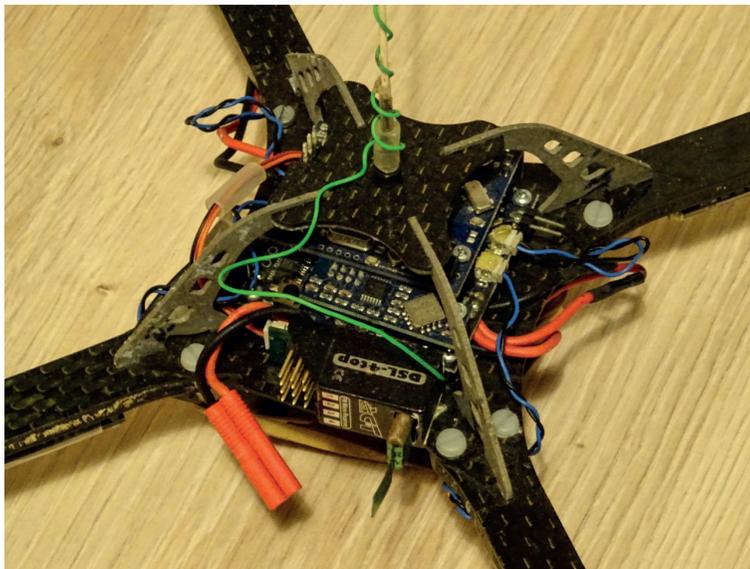


Bild 1: Elektronik des X-BL-Ufo aus dem Jahre 2007



Bild 8: Quadcopter mit integrierter Kamera

ses stellt während des Fluges die von der Kamera übermittelten Bilder dar. So hat der Quadcopter Pilot dann sowohl die Bilddaten des Quadcopters im Blick und kann außerdem auch mit diesem Sichtkontakt halten. Er kann sich also wenn er möchte gerade so fühlen, als wenn er selbst im Cockpit sitzen würde. Diese Art zu fliegen heißt FPV, First Person View. Sie wird später im Buch ausführlich beschrieben.

Es gibt bei vielen Quadcoptern auch weitere Zusatzfunktionen, welche tolle Effekte in der Luft erzeugen können. So gibt es solche, welche auf Knopfdruck selbstständig Figuren abfliegen können, beispielsweise einen Flip, also eine Drehung um die Nick- oder Roll- Achse oder auch eine Drehung um die Hoch- Achse, oder die Flugbahn einer Acht.



Bild 9: Fernsteuerung mit integriertem Display für die Bilddarstellung

Grundsätzlich geht der Trend klar in die Richtung, dass es in der Zukunft noch mehr RTF- Quadcopter auf dem Markt geben wird. Die einzelnen Zubehörteile können dann darauf montiert oder gesteckt werden. Mit der Software oder der Konfiguration muss sich der Anwender in der Zukunft eher noch weniger auseinandersetzen. Er wird für das Zu- und Wegschalten von Komponenten entweder nur Schalter umlegen müssen oder das System erkennt gleich selbst, welche Komponente gerade aktiviert ist und welche nicht.

Trotzdem werden die nächsten Kapitel ein vertieftes Verständnis über diese Komponenten geben. Gerade beim Kauf und beim Vergleich von verschiedenen Systemen untereinander kann es wichtig sein, die unterschiedliche Art der Sensoren, der Motoren, der Steuerelektroniken, Flugcontroller und deren Parameter zu verstehen. Wer außerdem auch noch einmal selbst etwas an sein System anbauen will, benötigt diese Informationen ebenfalls.

1.4 Steuerfunktionen und technischer Hintergrund

Quadcopter sind Fluggeräte mit vier Propellern. Sie besitzen dieselben Steuerungsmöglichkeiten wie Hubschrauber. Bild 10 veranschaulicht diese. In den weitaus meisten Fällen wird die Knüppelzuordnung bei

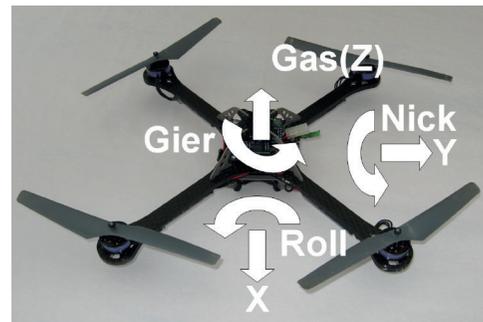


Bild 10: Steuerungsmöglichkeiten

funktioniert dann so, dass die schwingende Masse eine Metallplatte zwischen zwei Kondensatorplatten verschiebt und damit deren Kapazität verändert. Wenn die Drehung in die entgegengesetzte Richtung erfolgt, dann ist die Schwingung phasenverschoben. So kann also auch die Drehrichtung erkannt werden.

Die MEMS-Technologie ist heute erste Wahl für den Bau von Gyro-Sensoren. Es gibt heute aber auch noch Sensoren, welche auf der Basis von Piezoelementen funktionieren. Sowohl für die Schwingungsanregung als auch die Messung werden dann die Eigenschaften der Piezoelemente ausgenutzt. Diese weisen jedoch eine Temperaturdrift auf, deshalb müssen mit ihnen ausgestattete Quadrocopter vor dem Start oftmals eine automatische Kalibrierungsroutine starten.

Beschleunigungssensor

Bild 16 zeigt einen Beschleunigungs- oder in der häufig gehörten englischen Bezeichnung Acceleration-Sensor. Wieder wird eine seismische Masse in der MEMS-Technologie eingesetzt. Sie wird mit einer gedämpften Feder in allen drei Raumrichtungen aufgehängt. Wird das System geneigt, wie dargestellt, bewirkt die Erdbeschleunigung g eine Verschiebung dieser Masse.

Es werden jetzt in x - und in z -Richtung die projizierten Komponenten von g gemessen. Die beiden Pünktchen auf x und z zeigen dabei, dass es sich um Beschleunigung

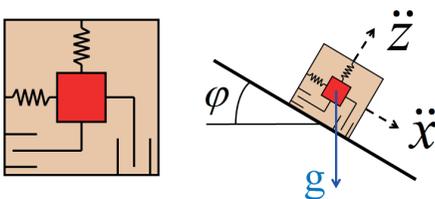


Bild 16: Beschleunigungssensor

gen handelt. Die Messung erfolgt wieder kapazitiv, dieses Mal jedoch in allen drei Raumrichtungen, von welchen in der Abbildung nur deren zwei dargestellt sind. Mit etwas Trigonometrie sieht man:

$$\ddot{x} = g * \sin(\varphi)$$

$$\ddot{z} = -g * \cos(\varphi)$$

Da ja „sin/cos = tan“ ist, folgt daraus

$$\tan(\varphi) = -\frac{\ddot{x}}{\ddot{z}}$$

Für kleine Winkel ist der Tangens immer genauso groß wie der Winkel selbst. Man kann das auch ausprobieren, indem man den Taschenrechner auf RAD für Radiant stellt. So vereinfacht sich dann die Gleichung zu:

$$\varphi = -\frac{\ddot{x}}{\ddot{z}}$$

Beschleunigungssensoren messen meistens dreidimensional auf einem Chip, also in x -, y - und z - Achse und werden mit einer nachgelagerten Elektronik auch direkt auf dem Chip ausgewertet. Der Neigungswinkel in der Nick- Achse wird wie oben beschrieben mit der x - und z -, derjenige in der Roll- Achse mit der y - und z - Komponente gemessen.

Kombination der Sensoren

Das ist einfach, könnte man also sagen: man benötigt für den Nick- und Roll- Winkel einen Beschleunigungssensor und für die Winkelgeschwindigkeit in der Gier- Achse einen Gyro.

Für die Gier- Achse ist das richtig. Für den Nick- und Roll- Winkel gestaltet sich das aber etwas komplizierter.

Mit beiden Sensoren, also mit dem Gier-

genommen könnte man den Empfänger mit den Fäden auch auf die andere Seite der Satelliten ziehen und bekäme dann eine zweite mögliche Position. Diese wäre jedoch in der Wirklichkeit weit im Weltraum draußen und würde deshalb aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen ausscheiden.

Atomuhr

Wie Beispiel 1 zeigt, breitet sich eine elektromagnetische Welle in sehr kurzer Zeit sehr weit aus, eben mit Lichtgeschwindigkeit. Die oben dargestellte Art der Positionsmessung funktioniert deshalb nur dann genau, wenn alle beteiligten Geräte über dieselbe genaue Zeitbasis verfügen. Bei Atomen geben die Elektronen eine Strahlungsfrequenz mit sehr hoher Reproduzierbarkeit ab, wenn sie ihre Energiezustände wechseln. Die Strahlungsfrequenz wird deshalb als Taktgeber für Atomuhren verwendet. Geeignet sind dafür Cäsium oder Rubidium-Atome. In den Satelliten sind immer gleich mehrere Uhren untergebracht. Es ist jeweils nur eine davon im Einsatz. Bei einem Defekt kann der Satellit jedoch einfach auf eine andere Uhr umgeschaltet werden und weitersenden.

Eine genaue Zeitbasis wäre selbstverständlich auch im Empfänger nötig, da dieser für die Laufzeitmessung des Signals Kenntnis über den exakten Sendezeitpunkt haben muss. Atomuhren sind jedoch aufwändig und teuer in der Herstellung. Deshalb musste man nach anderen Lösungen suchen, welche ohne solche genauen Uhren im Empfän-

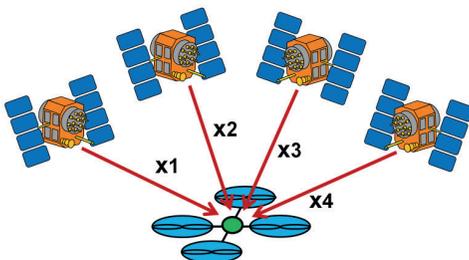


Bild 26: Vier GPS-Satelliten und Empfänger

ger auskommen können.

Stellt man sich bei Bild 26 mit vier GPS Satelliten wieder den dieses Mal an vier Fäden mit den beliebigen Längen x_1 bis x_4 aufgehängten Empfänger vor, dann wird bei drei straffen Fäden der letzte entweder durchhängen oder reißen. Erst wenn alle vier Fäden um den jeweils gleichen Betrag verlängert oder verkürzt werden, wird sich eine Konstellation ergeben, bei welcher alle vier Fäden straff gespannt sind. Das gleichmäßige Verlängern oder Verkürzen ist dabei nichts anderes, als die interne (ungenau) Uhr des Empfängers etwas vor- oder zurückzustellen. Der Weg, beziehungsweise die Verlängerung der Fäden, ist ja in der Wirklichkeit über die Beziehung $x = c \cdot t$ mit der Zeit verknüpft. Somit ergibt sich folgender Merksatz:

Drei Satelliten genügen wegen der ungenauen Zeitbasis des Empfängers nicht zur Positionsbestimmung. Um diese abzugleichen werden deshalb immer mindestens vier Satelliten benötigt.

Jeder Satellit sendet auch seine aktuelle Position aus. Die vier Satelliten erlauben so eine Positionsbestimmung im dreidimensionalen Raum. Es wird also neben der Position auf der Erde auch die Höhe gemessen. Der vierte Satellit macht dies aus obengenanntem Grund erst möglich, er liefert dafür aber zusätzlich auch noch die genaue Zeit. Sie gilt auch als vierte Dimension. Aus diesem Grund kann jeder GPS-Empfänger auf die exakte Zeit zurückgreifen. Sobald also genügend Satelliten sichtbar sind, hat er eigentlich so etwas Ähnliches wie eine virtuelle Atomuhr eingebaut.

Anzahl der Satelliten

Damit die Laufzeitmessung funktionieren kann, dürfen die Satellitensignale nicht an der Erdoberfläche reflektiert werden, be-

Wenn die Fresnel- Zone frei ist von Hindernissen und auch der Boden nicht in den Weg kommt, dann ist der sichere Empfang innerhalb der angegebenen Reichweite der Fernsteuerung gewährleistet.

Die Höhe h der Fresnel Zone ist vom Abstand zwischen Fernsteuerung und Modell abhängig. Für 2,4-GHz-Fernsteuerungen beträgt sie bei 50 m Abstand 1,25 m und bei 100 m Abstand 1,75 m. Insbesondere, wenn man nahe am Boden fliegt, kann dieser etwas in die Fresnel Zone hineinragen. Die dargestellte „Seitenwelle“ (a und b) wird dann innerhalb der Fresnel Zone reflektiert und trägt wegen obiger Ausführungen zur Verschlechterung der Empfangsqualität bei.



Bild 67: Fresnel Zone bei unebenem Boden

Um das Empfangssignal zu verbessern, muss man immer darauf achten, dass der Boden möglichst wenig in die Zone hineinragt. Dazu nützt hier einerseits ein erhöhter Standort des Modellpiloten oder auch eine Flughöhe von wenigstens einigen Metern.

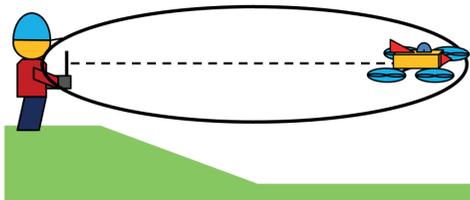


Bild 68: Fresnel Zone bei erhöhtem Standort des Piloten

Ein erhöhter Standort des Piloten verbessert also nicht nur die Sicht, sondern ist auch im Hinblick auf eine möglichst freie Fresnel Zone von Vorteil.



Bild 69: Optimale Antennenausrichtungen von Sender und Empfänger

Antennenausrichtung

Senkrecht ausgerichtete Senderantennen strahlen in horizontaler Richtung mit der maximalen Leistung ab. Auch vertikal ausgerichtete Empfängerantennen können in horizontaler Richtung ein maximales Signal empfangen. Deshalb sind vertikale Antennenstellungen für den Modellbau optimal. Bei einem leicht erhöhten Standort des Piloten kann die Senderantenne auch ganz leicht nach vorne geneigt sein.

Stellt man sich vor, dass der Sender ein Lichtpunkt ist, dann hat dieser Lichtpunkt so eine optimale Projektion auf die gesamte Länge der Empfangsantenne. Diese Darstellung ist zwar etwas vereinfacht, sie gibt die wahren Verhältnisse jedoch ziemlich gut wieder.

Wenn jetzt die Empfängerantenne gegenüber der Senderantenne etwas verdreht wird, dann wird die Projektionsfläche kleiner, auch das Empfangssignal wird so etwas schwächer. Wenn die Empfängerantenne nicht in diese Richtung, sondern bildlich gesprochen ins Blatt hinein beziehungsweise aus dem Blatt herausgedreht würde, würde das Empfangssignal wegen der dann unterschiedlichen Polarisation ebenfalls abgeschwächt.

Ganz schlecht wird das Empfangssignal, wenn die Sender- und Empfangsantenne senkrecht zueinander ausgerichtet sind. Es ist dabei gleichgültig, ob die Senderantenne in Richtung des Empfängers zeigt oder umgekehrt. In diesem Falle ist gar keine Pro-

6.2 Ein einfaches physikalisches Modell

Es liegt somit nahe, dass die Kraft F_R – die Rotationskraft – für diese Drehung verantwortlich sein muss. In einer vereinfachten Darstellung wird also im Folgenden nur die Wirkung von F_R weiter untersucht (und es werde stillschweigend angenommen, dass der Quadrocopter durch das nicht eingezeichnete F auch noch schwebt und allenfalls driftet).

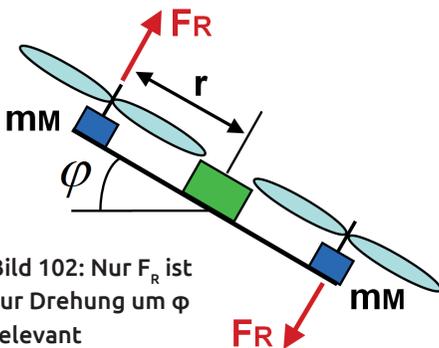


Bild 102: Nur F_R ist zur Drehung um φ relevant

Zum Schluss des Kapitels wird es noch einmal richtig kompliziert. Um ein einfaches physikalisches Modell herzuleiten muss jetzt mit dem Trägheitsmoment J und dem Drehmoment M operiert werden.

- a) $M = J \cdot \ddot{\varphi}$
- b) $2 \cdot F_R \cdot r = 2 \cdot m_M \cdot r^2 \cdot \ddot{\varphi}$
- c) $\ddot{\varphi} = \frac{F_R}{m_M \cdot r}$

Bild 103: Einige Formeln für ein physikalisches Modell

a.) besagt, dass Drehmoment = Trägheitsmoment \times Winkelbeschleunigung ist. Diese Formel ist speziell dann, wenn der Physikunterricht weit zurückliegt, nicht mehr unbe-

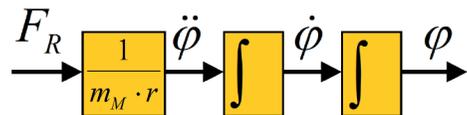
dingt geläufig. Sie kann aber aus $F = m \cdot a$ (Kraft = Masse \times Beschleunigung) abgeleitet werden. Die beiden Formeln sind nämlich ähnlich, während $F = m \cdot a$ für eine Bewegung entlang einer Achse gilt, gilt $M = J \cdot \ddot{\varphi}$ für Drehungen um eine Achse. $\ddot{\varphi}$ ist dabei die sogenannte Winkelbeschleunigung oder die zweite Ableitung des Winkels nach der Zeit. b) ist eine Umformung in Größen, welche in Bild 96 dargestellt werden, es gilt

$M = 2 \times F_R \times r$ und $J = 2 \times m_M \times r^2$. Bei der Berechnung des Trägheitsmoments J wird angenommen, dass die Massen der Achse hauptsächlich aus den Motormassen m_M bestehen.

Das alles kann mit c.) nach $\ddot{\varphi}$ aufgelöst werden und es ergibt sich folgender Merksatz:

Die Rotationskraft F_R wirkt auf die Winkelbeschleunigung $\ddot{\varphi}$.

Es wurde bereits beim Kapitel über den Flugcontroller und die Steuerungsplatine erklärt, dass sich der Quadrocopter selbst ausbalanciert. Der Pilot gibt also mit dem Steuerknüppel nur einen gewünschten Anstellwinkel φ vor, welcher dann über interne Regler erreicht wird. Die Regler werden



oder

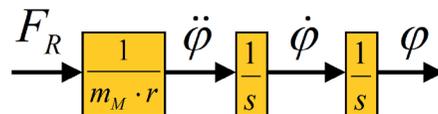


Bild 104: Ein physikalisches Modell einer Achse

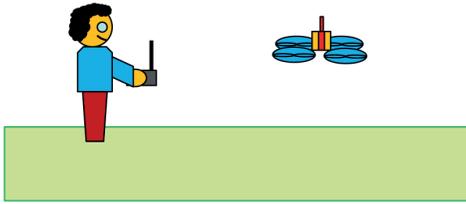


Bild 190: Quer-Schwebelage

auch auf die andere Seite zu drehen, wieder bis zu einer Viertelumdrehung hin. Am Ende beherrscht man diese Figur mit der Drehung auf beide Seiten gleich gut und kann insbesondere auch in den Phasen 2 verharren, in den Quer-Schwebelagen also. Man kann den Quadrocopter also auf beide Seiten quer stellen und ihn so steuern, dass er an Ort und Stelle bleibt. Die Bilder 190, 191 und 192 zeigen diese Quer-Schwebelage.

Die quergestellte Acht

Nun ist es an der Zeit, eine erste in sich geschlossene Figur zu fliegen, nämlich eine quergestellte Acht.

Das Bild 193 zeigt mit einer Ansicht von oben, wie das gemeint ist. Der Vorteil einer quergestellten Acht ist, dass man in den beiden Rundungen jeweils in der Heck-Schwebelage mit einer Bewegung um die Nick-Achse vorwärts fliegen kann. Das ist in der Darstellung dort, wo die beiden Pfeile eingezeichnet sind. Dazwischen muss der Quadrocopter jeweils quergestellt werden, so wie es in der letzten Figur von Bild 190 geübt wurde. Insbesondere muss man so während der ganzen Figur nie in die schwierige Fluglage „Nasenflug“ wechseln, in welcher einem der Quad- oder Multicopter entgegenfliegen würde. Der Vorwärtsflug ist in diesen quergestellten Positionen mit einer zusätzlichen leichten Bewegung um die Nick-Achse realisierbar und auch die Geschwindigkeit wird so kontrolliert. Eine höhere Geschwindigkeit realisiert man mit etwas mehr „Nick“ und



Bild 191: Quer-Schwebelage eines Quadrocopters vom Piloten aus gesehen



Bild 192: Quer-Schwebelage eines Octocopters vom Piloten aus gesehen

eine geringere mit etwas weniger „Nick“. Die Figur der quergestellten Acht ist dann relativ einfach zu erlernen, wenn man die vorangehenden Übungen gut beherrscht. Die ersten Achten werden wahrscheinlich noch ziemlich eckig herauskommen, mit Drehungen am Ort und dann gefolgt von Vorwärts-

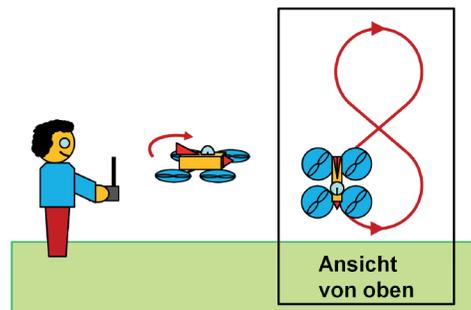


Bild 193: Quergestellte Acht